

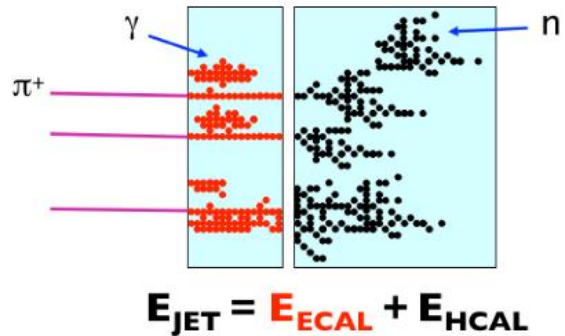
# Progettazione di un calorimetro adronico con MPGD per un futuro esperimento al Muon Collider

A. Colaleo, L. Longo, A. Pellecchia, R. Radogna, F. Simone, A. Stamerra,  
P. Verwilligen, R. Venditti, A. Zaza

Incontri di Fisica delle Alte Energie

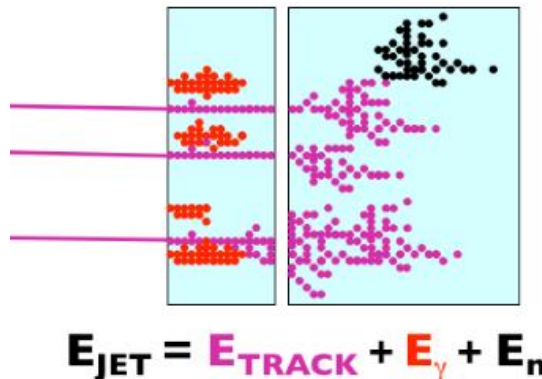
Catania, 13 Aprile 2023

# Calorimetri per Particle-Flow



## Approccio tradizionale

- Jet ricostruito come singolo oggetto
- Energia misurata combinando ECAL + HCAL
- ~ 70 % dell'energia del jet misurata in HCAL a bassa risoluzione (<60%)



## Approccio Particle Flow

- particelle del jet ricostruite singolarmente
- Si sfruttano i rivelatori più accurati
- ~ 10 % dell'energia del jet è effettivamente misurata in HCAL

- Richieste per futuri collider:
- risoluzione in energia dei jet:  $\sigma_E/E < 3.5\%$
  - **Alta granularità**

- Richieste per HCal
- **separare** con efficienza adroni neutri da carichi -> **alta granularità** - trasversa e longitudinale

# Calorimetro adronico per Muon Collider

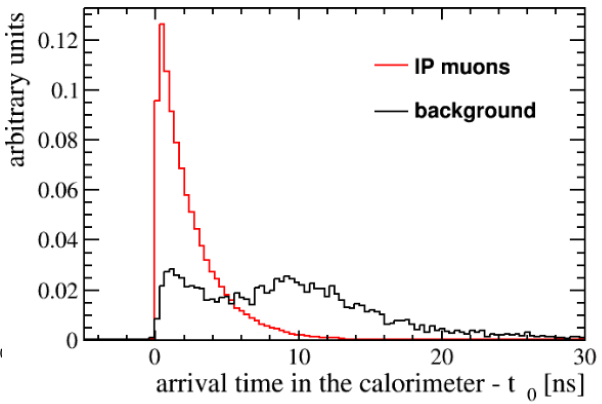
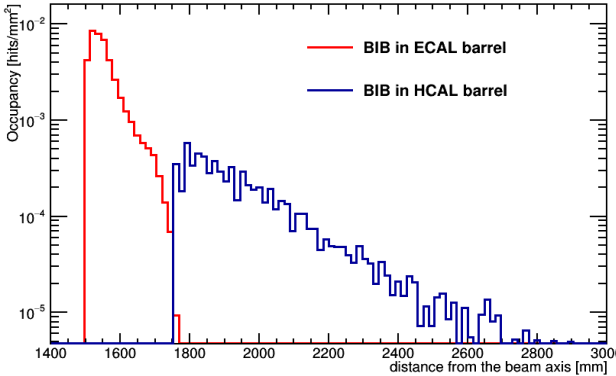
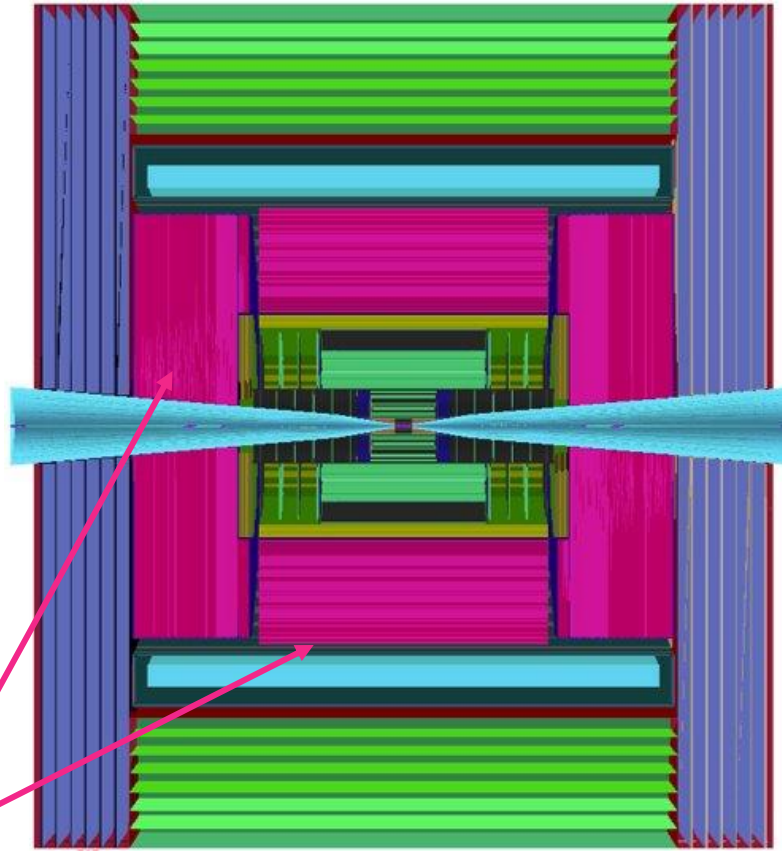
Sezione esperimento al Muon Collider

## Muon collider

- ▶ Combina il meglio di acceleratori di adroni e di leptoni
  - ▶ Trascurabile radiazione di sincrotrone
  - ▶ Alte energie (multi-TeV) raggiungibili nel sistema del centro di massa
- ▶ tra i migliori candidati per studiare i processi SM e per la ricerca di nuova Fisica nell'era post HL-LHC

## Sfide tecnologiche

- ▶ Intenso flusso di particelle dovuto al **decadimento dei  $\mu$  del fascio** e alle interazioni secondarie con il rivelatore (**BIB**)
  - ▶ richiede accurato design dei rivelatori per discriminazione del fondo



**Calorimetro adronico**  
Richieste per soppressione del BIB:

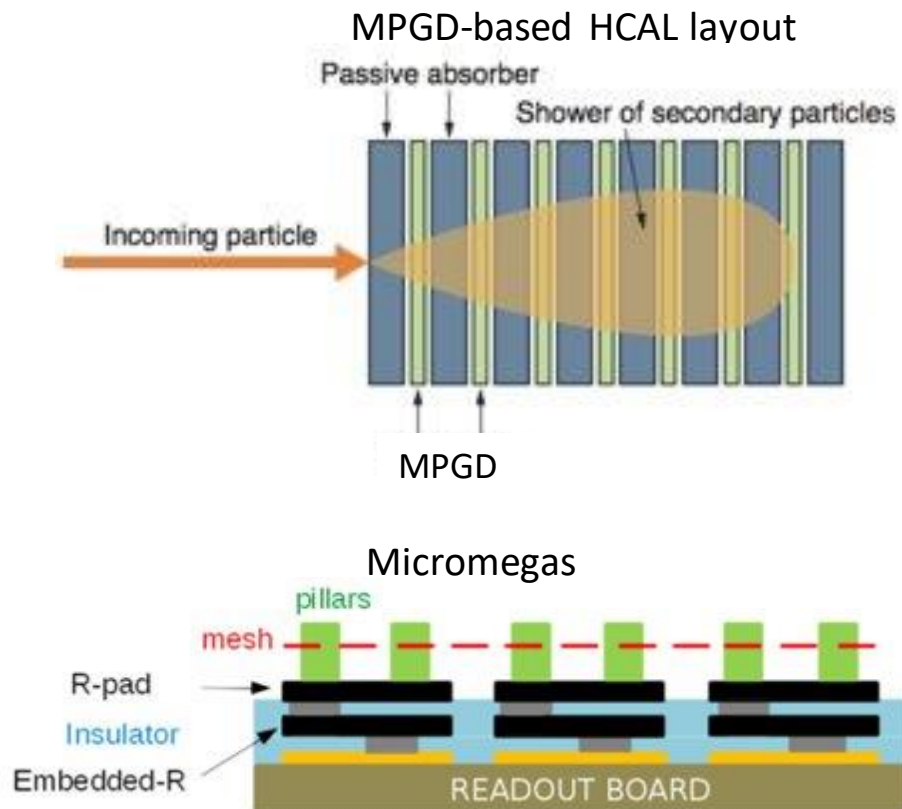
- tecnologia resistente alla radiazione
- alta granularità
- alta risoluzione temporale (~ ns)

# Calorimetro adronico con MPGD

La collaborazione **CALICE**<sup>(\*)</sup> ha già proposto l'uso di rivelatori a gas (RPCs, GEMs and Micromegas) come strati attivi per calorimetri adronici per implementare readout **digitali** e **semi-digitali**.

## Perché Micro Pattern Gas Detectors (MPGD)?

- Possibilità di raggiungere **alta granularità**
  - Utilizzo di miscele gassose a **basso impatto ambientale**
  - Resistenti alla radiazione
  - Alta rate capability (fino a 10 MHz/cm<sup>2</sup>)
  - Risoluzione spaziale flessibile (> 60 μm)
  - Alta risoluzione temporale (decine di ns)
  - Basso costo per ricoprire grandi aree degli esperimenti
- 
- **μRWell** e **μmegas** resistive migliori candidati al momento per ridurre gli effetti di scariche nel gas



(\*)arXiv:1901.08818

# Progettazione HCAL con MPGD: strategia

Studiare in GEANT4 la risposta ai singoli pioni:  
- contenimento dello sciame, dimensione delle celle di RO (granularità), risoluzione energetica, discriminazione di background.

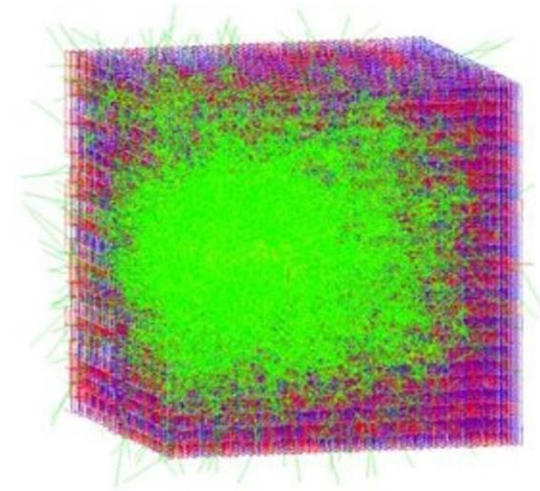
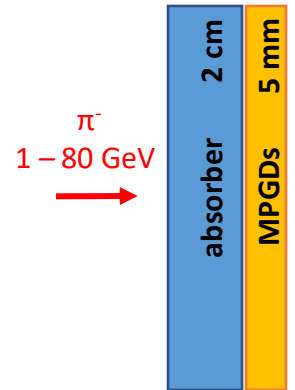
Implementare il design nel contesto dell'intero apparato nel sistema del Muon Collider per studiare l'impatto sulla ricostruzione dei jet

Costruire un prototipo di MPGD - HCAL di piccole dimensioni e misurare le prestazioni su fascio di pioni

# Simulazione in GEANT4

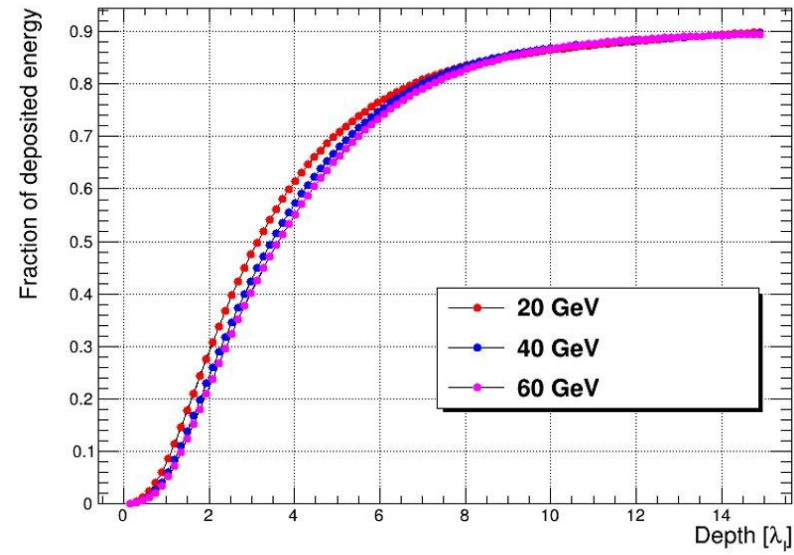
# Studi con GEANT4 - Contenimento

- Geometria implementata**
- Calorimetro a campionamento costituito da
    - 2 cm di Ferro (**assorbitore**)
    - 5 mm di Ar/CO<sub>2</sub> (**strato attivo**)
    - Granularità celle ( 1x1 cm<sup>2</sup> e 3x3 cm<sup>2</sup>)

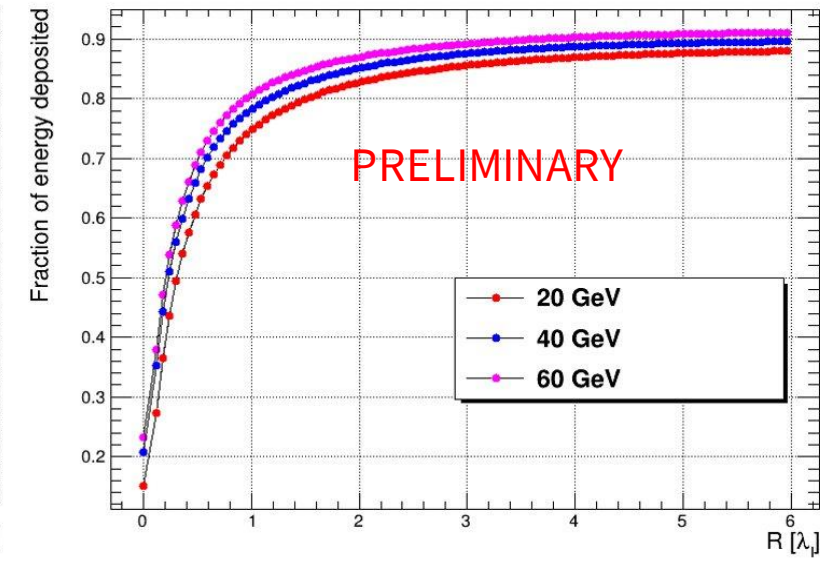


- Energia contenuta al 90% con
- 14  $\lambda_N$  nella direzione del  $\pi$  incidente
  - 3  $\lambda_N$  nella direzione trasversa

Contenimento nella direzione del  $\pi$  incidente

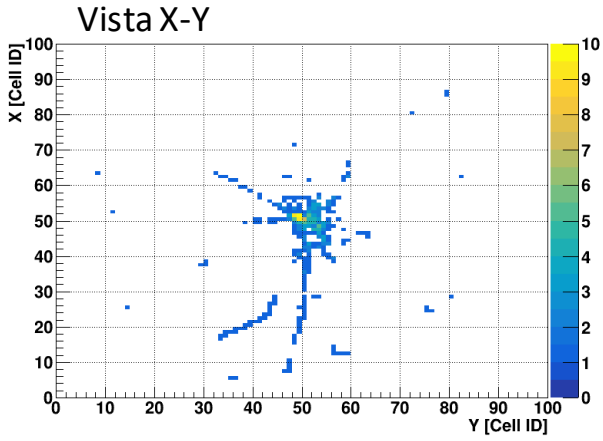
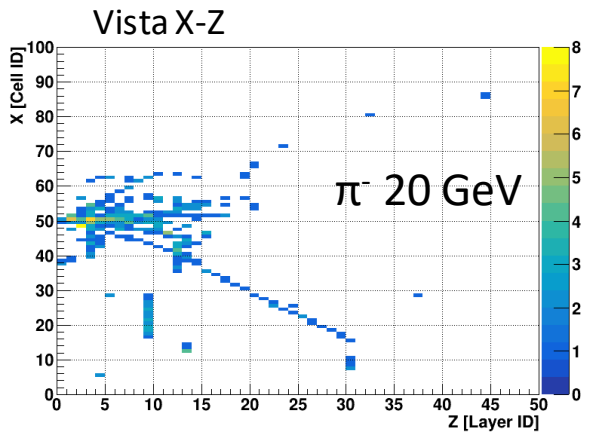


Contenimento trasversale





# Studi con GEANT4 - Risoluzione energetica RO Digitale (Singola Soglia)

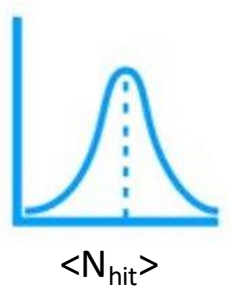


**1st step: Digitizzazione:**

1 HIT  $\leftrightarrow$  1 cella in cui il deposito di energia è superiore a una soglia (30 eV)

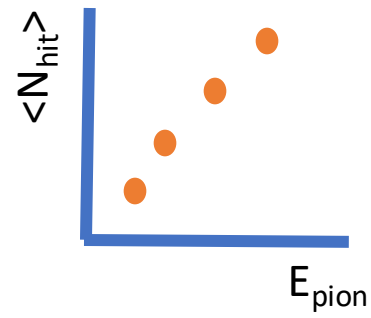
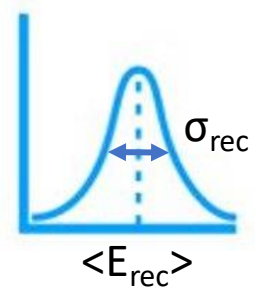
**2nd step:** Estrarre  $\langle N_{hit} \rangle$  dalla

distribuzione di  $N_{hit}$  per evento per ogni valore di energia del pione incidente  $E_{pion}$



**4th step:** Ricostruire la distribuzione di energia attraverso la funzione di risposta inversa  $E = f^{-1}(N)$  per estrarre  $\langle E_{rec} \rangle$  e  $\sigma_{rec}$

**3rd step:** Studiare la funzione di risposta del calorimetro  $\langle N_{hit} \rangle = f(E_{pion})$

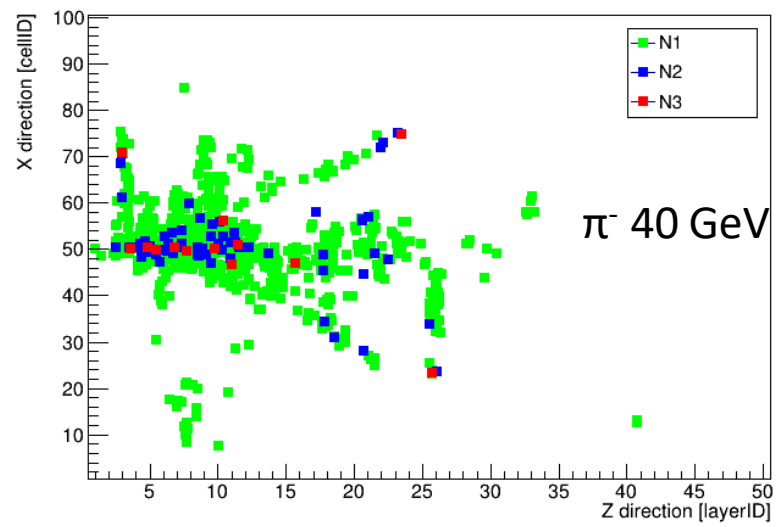




# Studi con GEANT4 - Risoluzione energetica RO Semi-Digitale (Soglie multiple)



- Digitizzazione:** soglie multiple and hit pesate
- **Soglia bassa  $t_1$**  ->  $N_1$  è il numero di hits con  $t_1 < E_{hit} < t_2$
  - **Soglia media  $t_2$**  ->  $N_2$  è il numero di hits con  $t_2 < E_{hit} < t_3$
  - **Soglia alta  $t_3$**  ->  $N_3$  è il numero di hits con  $E_{hit} > t_3$



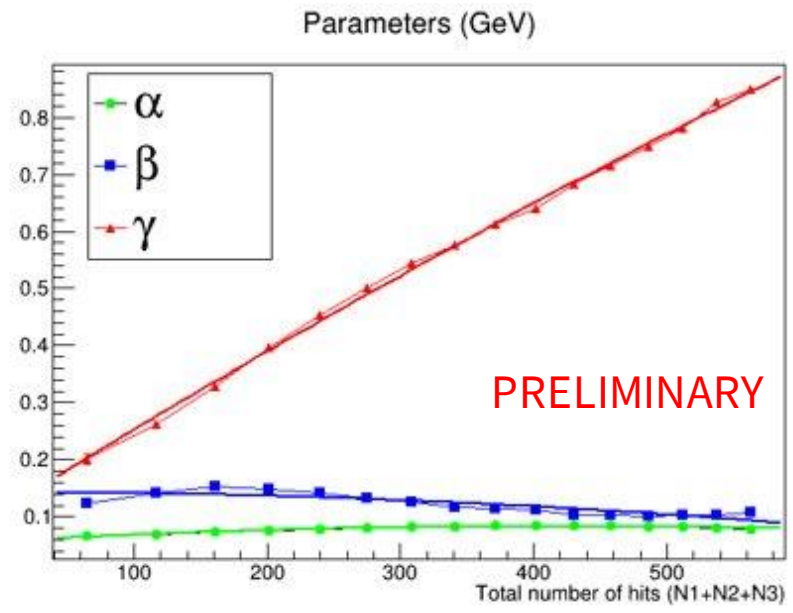
**Ricostruzione:** Energia ricostruita tramite formula empirica

$$E_{rec} = \alpha \cdot N_1 + \beta \cdot N_2 + \gamma \cdot N_3$$

- dove i pesi
- dipendono dall'energia (parametrizzati in funzione di  $N_{tot} = N_1 + N_2 + N_3$ )
  - sono calcolati per ogni valore di energia **minimizzando** la funzione

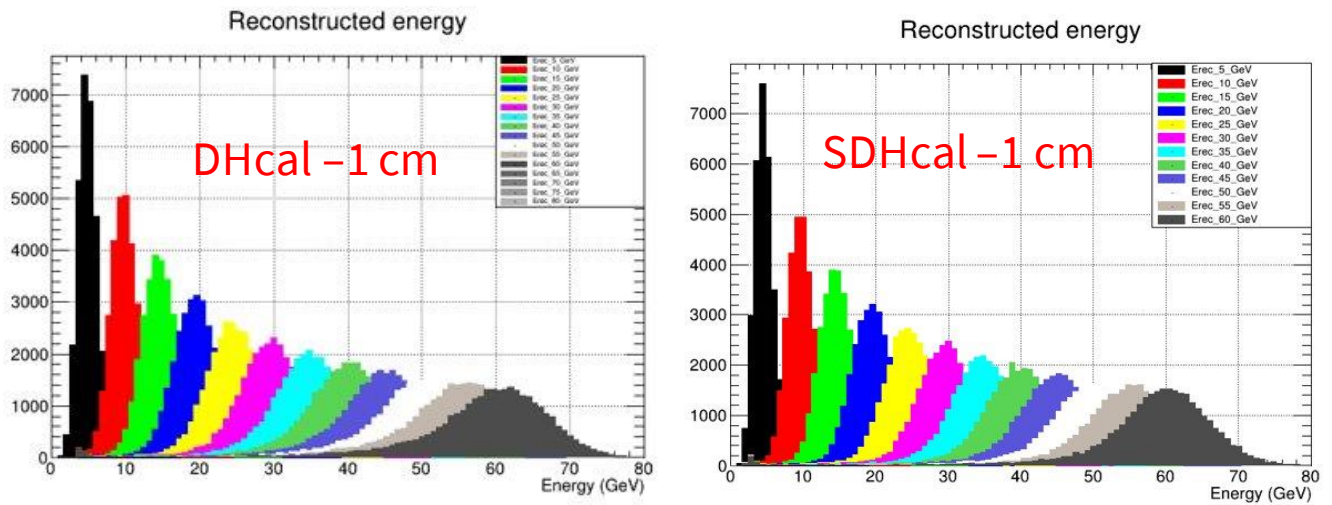
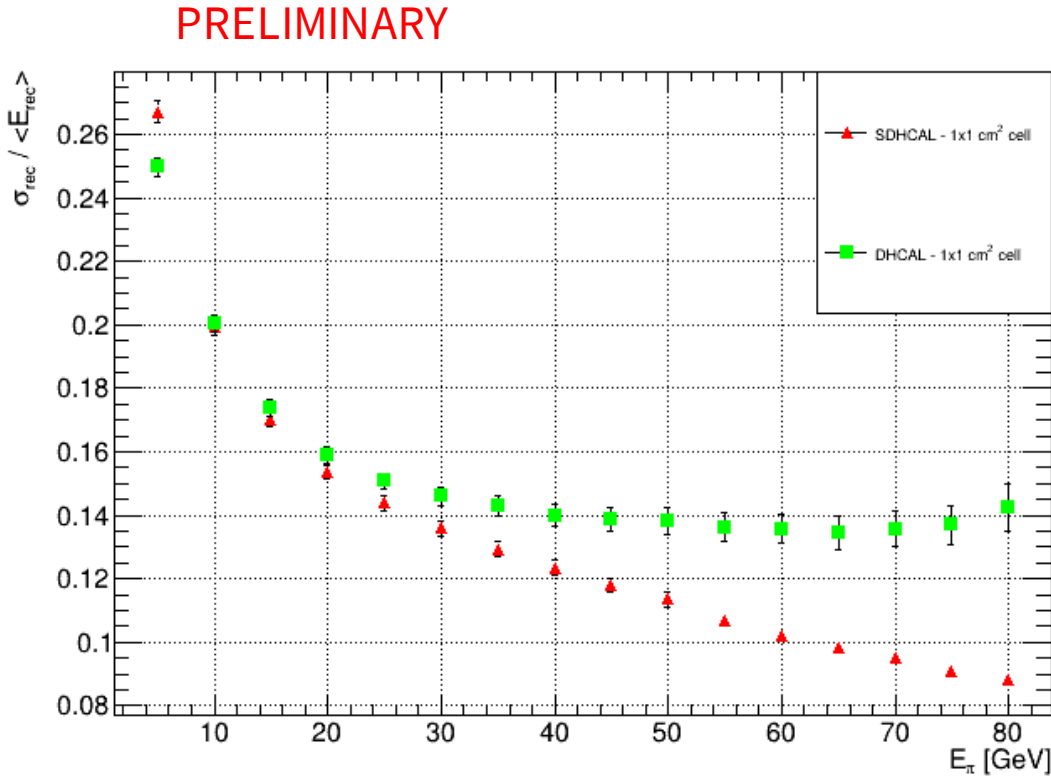
$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(E_{true}^i - E_{rec}^i)^2}{E_{true}^i}$$

dove N è il numero di eventi



# Studi con GEANT4 - Risoluzione energetica

## Confronto SDHcal - DHcal



**DHcal** risente dell'effetto di saturazione del  $N_{hit}$  – unica variabile usata per la ricostruzione – soprattutto ad alte energie ( $E > 40$  GeV):

- Distribuzioni di  $E_{rec}$  più piatte
- Presenza di code più lunghe alte a bassa energia

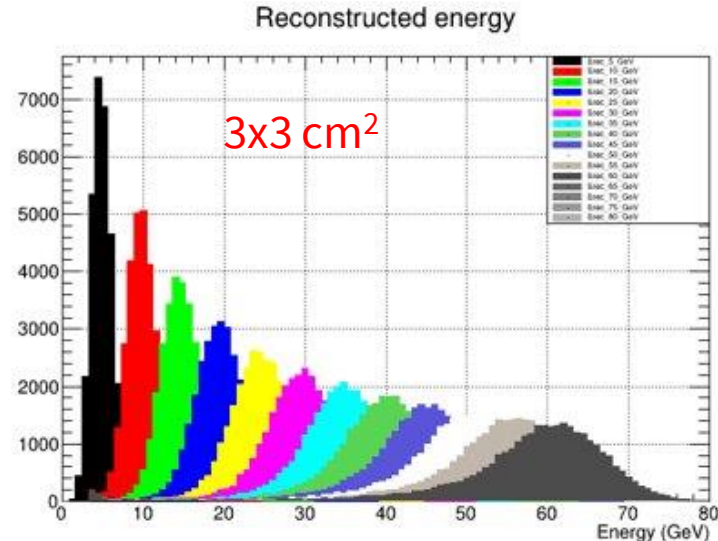
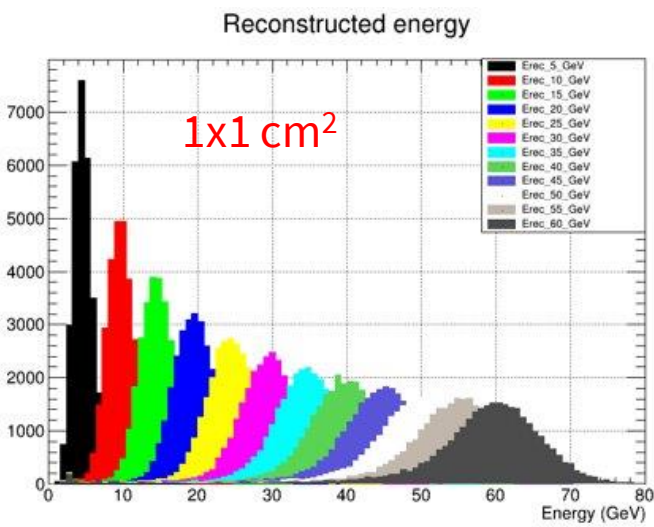
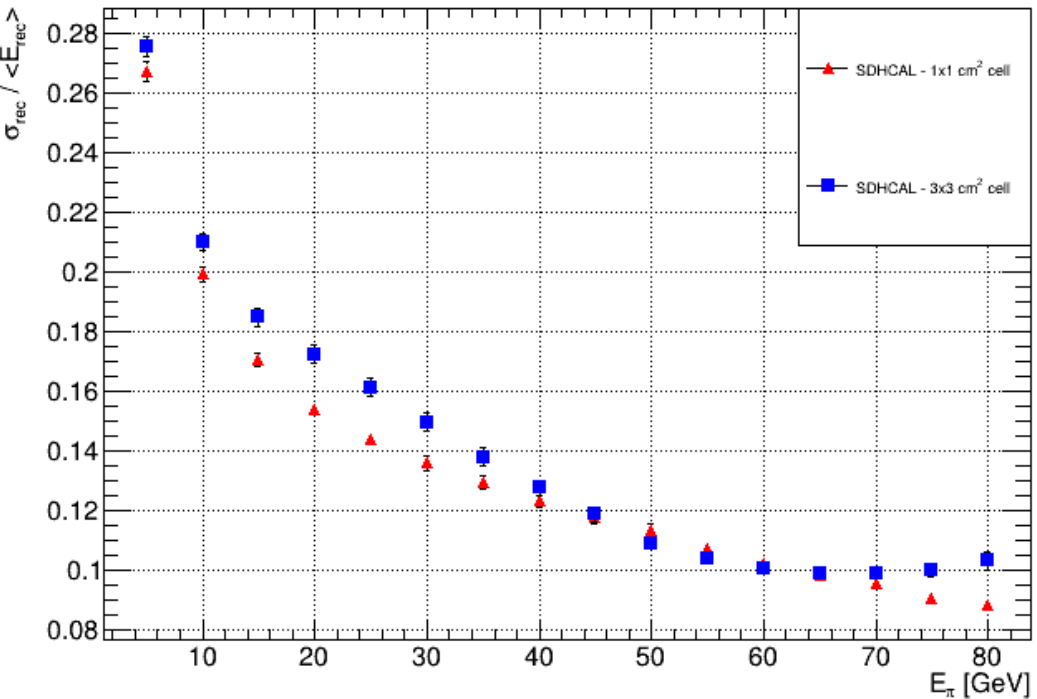
Risoluzione per  $E = 80$  GeV:

- DHcal  $\sim 14\%$
- SDHcal  $\sim 8\%$

# Studi con GEANT4 - Risoluzione energetica

## Confronto SDHcal 1x1 cm<sup>2</sup> – SDHcal 3x3 cm<sup>2</sup>

PRELIMINARY



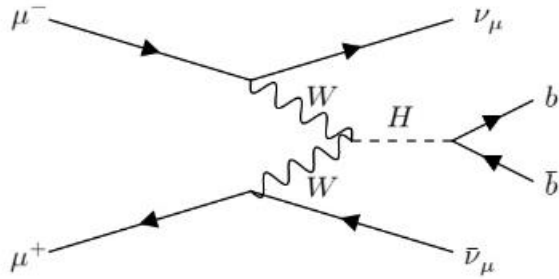
Aumentando la dimensione della cella si risente prima dell'effetto di saturazione del  $N_{hit}$

La risoluzione a 80 GeV

- SDHcal 3x3 cm<sup>2</sup> ~ 10%
- SDHcal 1x1 cm<sup>2</sup> ~ 8%

# Simulazione nel Muon Collider framework

# HCal con MPGD al Muon Collider

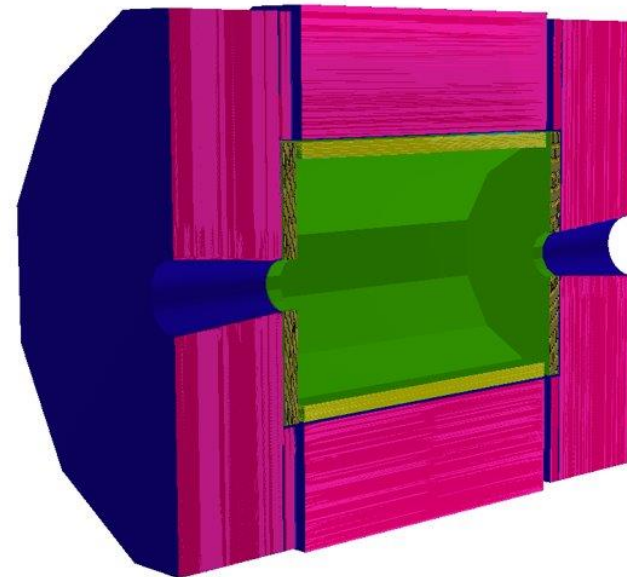


Benchmark process:  $\mu^+ \mu^- \rightarrow H \nu_\mu \bar{\nu}_\mu \rightarrow b \bar{b} \nu_\mu \bar{\nu}_\mu$   
all'energia del centro di massa di 1.5 TeV

- 10k eventi prodotti con Pythia
- 100 BIB eventi
- Eventi di segnale simulati nell'intero esperimento con segnale di BIB sovrapposto
- Ricostruzione dell'intero evento
  - per entrambe le geometrie

## Geometria implementata nel MuCol Software

- Calorimetro a campionamento costituito da
  - **Assorbitore**: spessore di 2 cm
  - **Strato attivo**: spessore di 3 mm
- Celle di granularità pari a  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  - RO Digitale
- **BASELINE**: Scintillatore (Polystirene) + Acciaio
- **MPGD Hcal**: Argon gassoso + Ferro



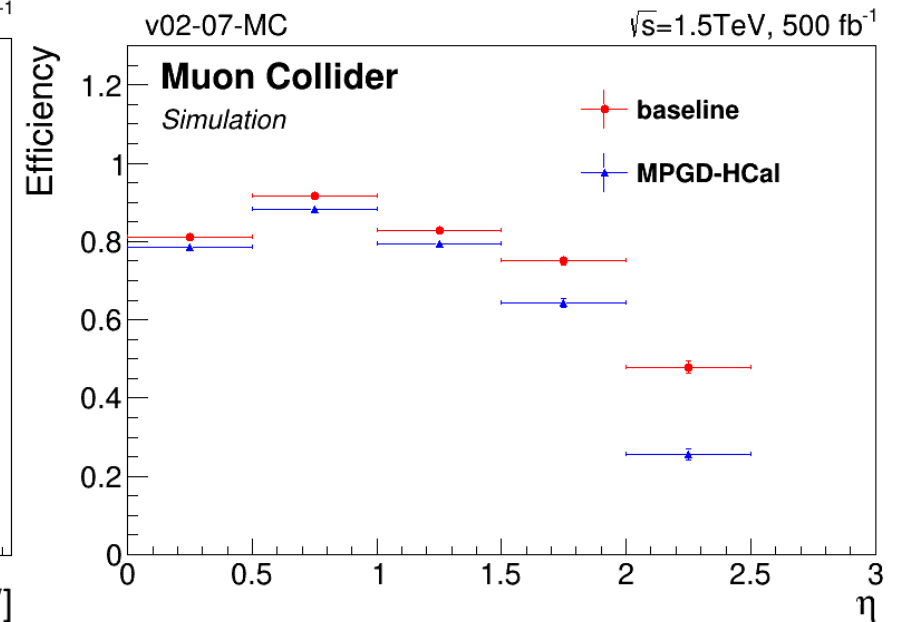
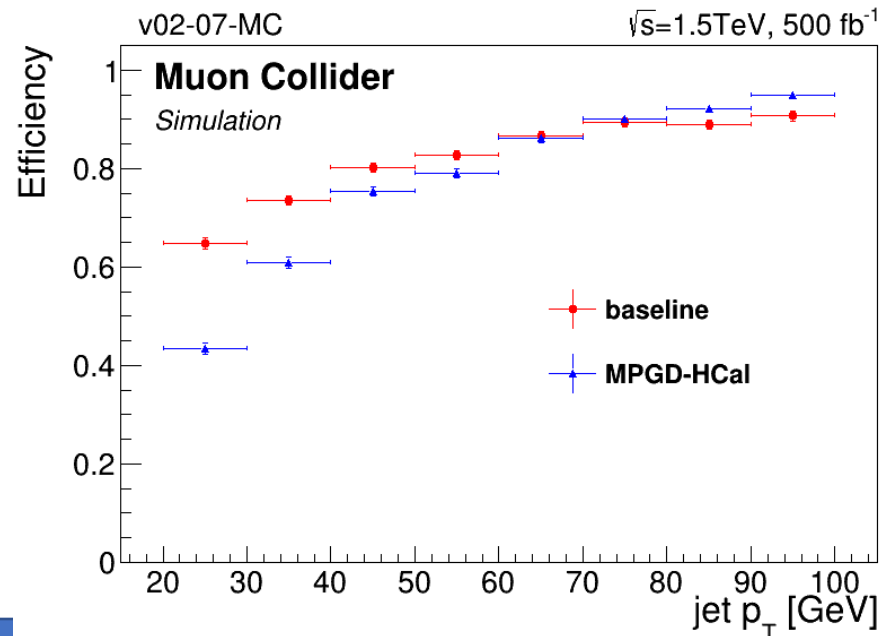
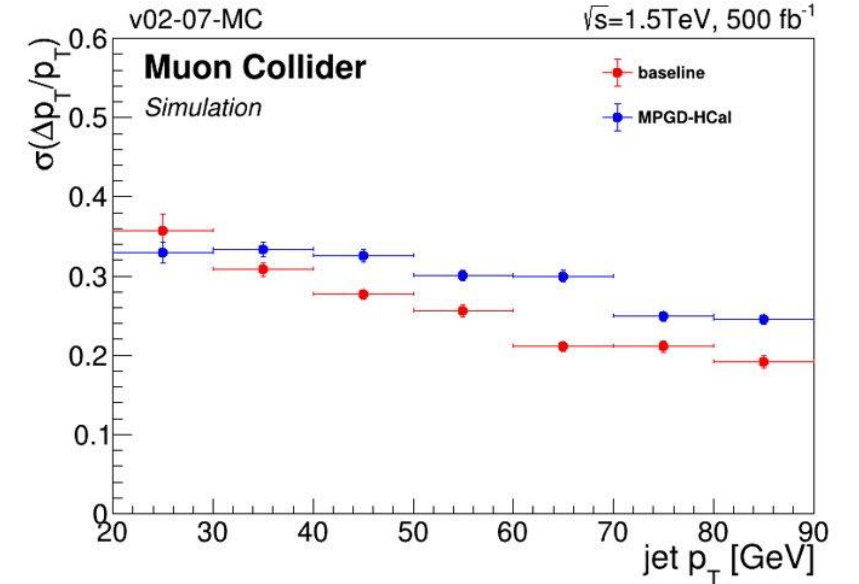
# HCal con MPGD al Muon Collider - Prestazioni a confronto

Le performance delle **geometria MPGD-HCal** in termini di

- efficienza di ricostruzione
- risoluzione in  $p_T$  dei jet

sono **confrontabili** con quelle della **baseline** (scintillatore + acciaio).

PRELIMINARY



# Progettazione di un prototipo di calorimetro

in collaborazione con

INFN, Sez. di Bari

INFN, Sez. di Roma III

INFN, Sez. Di Frascati

INFN, Sez. Di Napoli

CERN

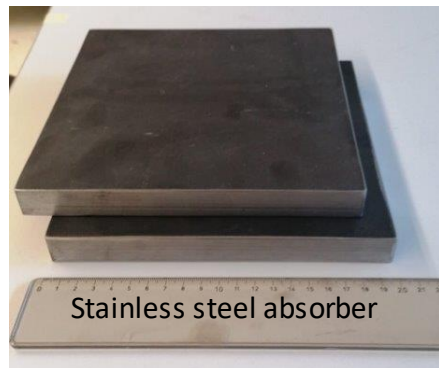
Weizman Institute of Science



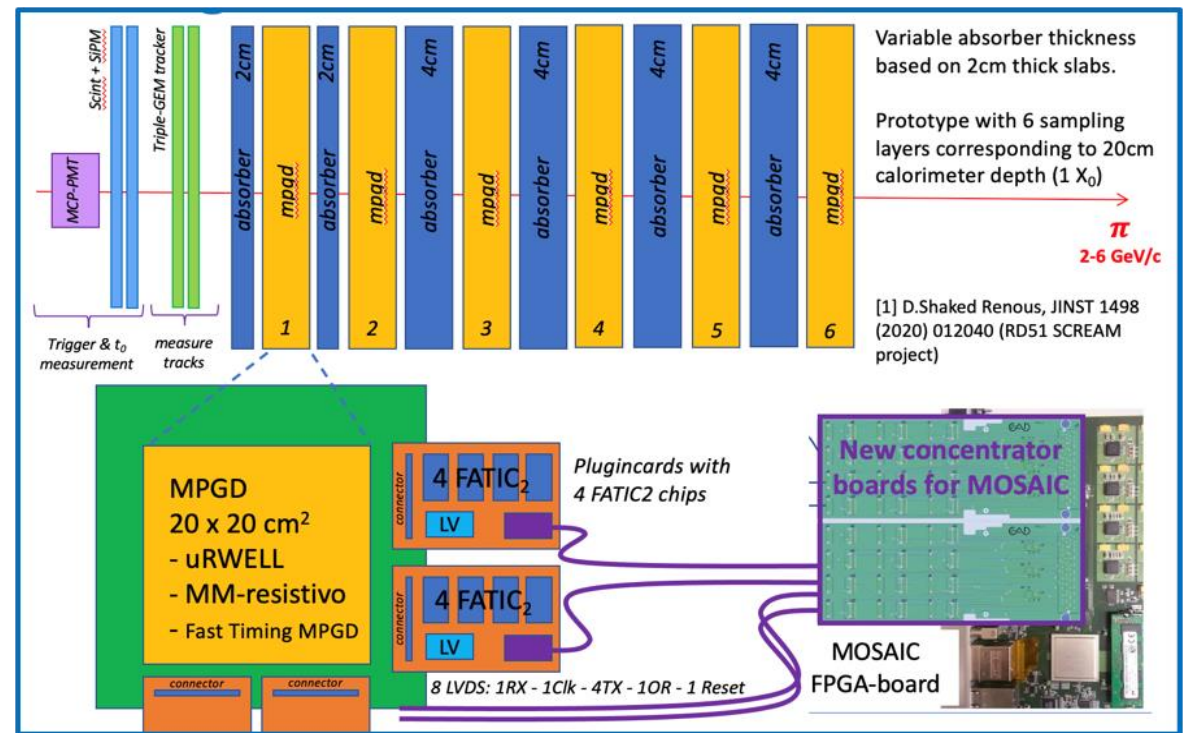
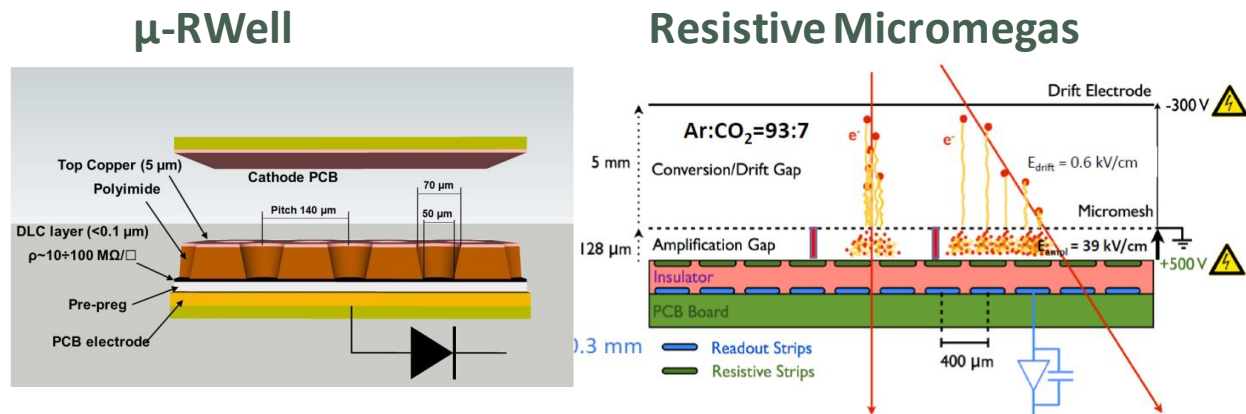
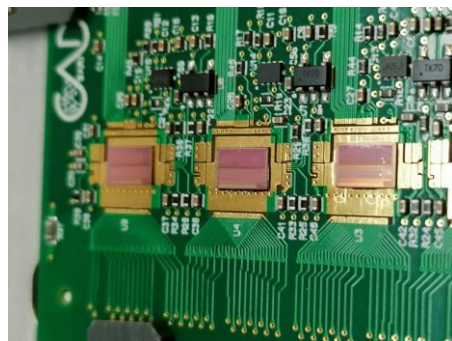
# Prototipo MPGD-HCAL

**GOAL:** validare le simulazioni misurando le performance di un prototipo sperimentale in test beam con pioni fino a 10 GeV

- **6 layers attivi** costituiti da resistive MPGDs
  - Resistive  $\mu$ -RWell e MicroMegas
  - 20x20 cm<sup>2</sup> con pad di dimensioni di 1 cm<sup>2</sup>
- Per FE Read Out: **FATIC**<sup>(\*)</sup> asic
  - per misure di carica delle hits e di timing
  - Possibilità di emulare RO semi-digitale



FATIC chips

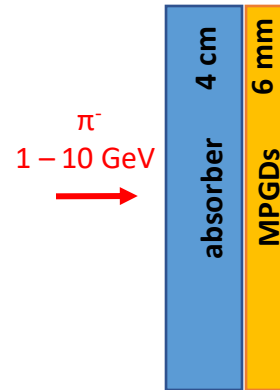


(\*)DOI: 10.1109/IWASI.2019.8791274

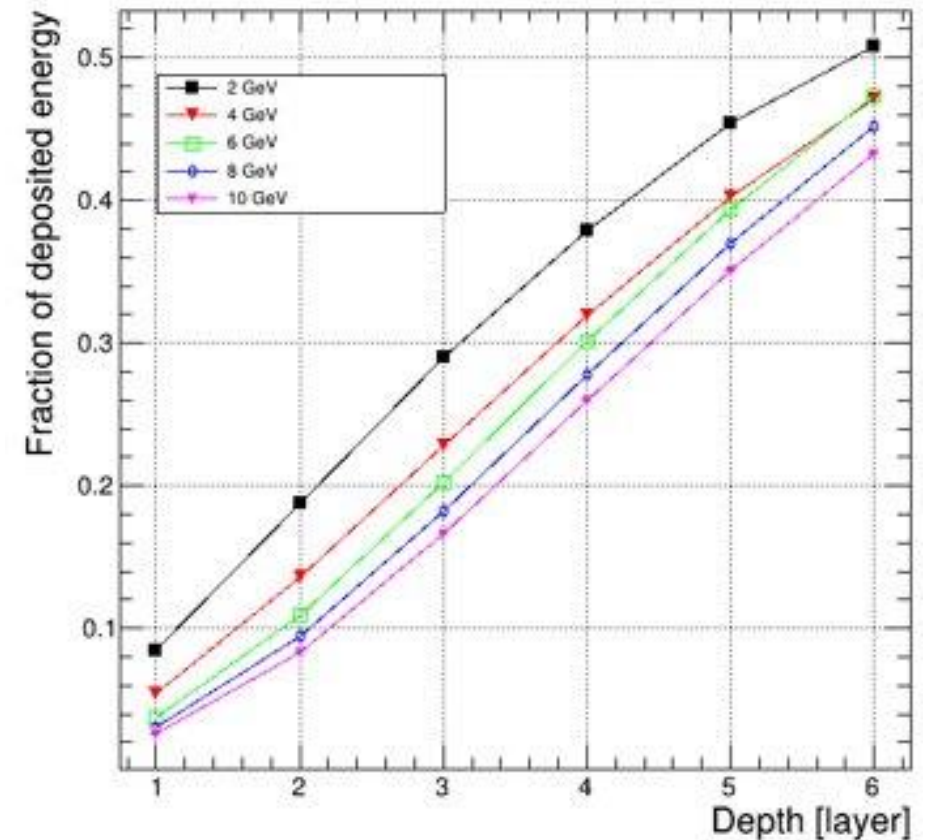
# Simulazione Geant4 del prototipo sperimentale

## Geometria implementata

- Calorimetro a campionamento costituito da
  - 4 cm di Ferro (**assorbitore**)
  - 1 mm di rame (catodo del rivelatore)
  - 6 mm di Ar/CO<sub>2</sub> (**strato attivo**)
  - 1 mm di FR4 per la RO PCB
- Granularità celle 1x1 cm<sup>2</sup> (= RO pad dei rivelatori)
- Area trasversale 20x20 cm<sup>2</sup>

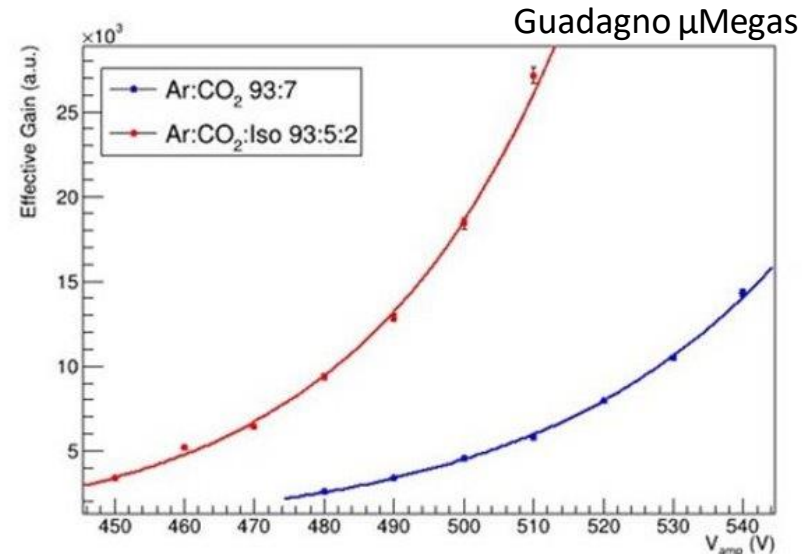
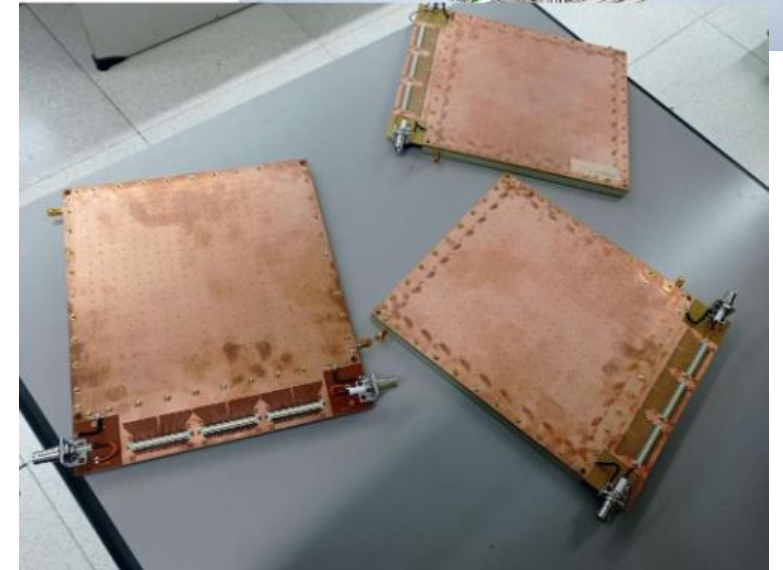
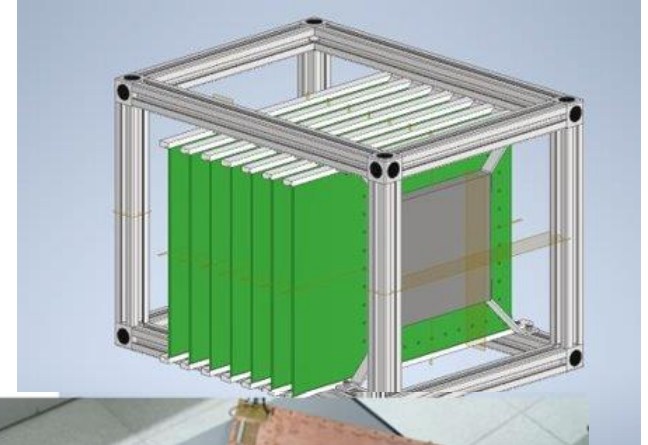


Contenimento longitudinale  
escludendo eventi di tipo MIP



# Prototipo MPGD – HCal: Piani futuri

- Test sui singoli rivelatori per misurarne guadagno e efficienza ai muoni cosmici
- Test Beam con MIP su telescopio con tutti i rivelatori + tracker (luglio 2023 a SPS)
  - Efficienza, cluster size, pad multiplicity, risoluzione spaziale e temporale
- Test Beam su prototipo di calorimetro ( 6 – 8 layer  $\sim 1 \lambda_N$ ) con pioni da 1 – 10 GeV (agosto 2023)
  - Risoluzione energetica con RO digitale e semidigitale



PRELIMINARY

# Conclusioni e studi futuri

## Simulazione MPGD-HCal in G4– studi di risposta al singolo $\pi$ : $1 \times 1 \text{ m}^2$ – 50 layer con RO DHCal e SDHCal

- 90% di **energia contenuta** in  $14 \lambda_N$  longitudinalmente e in  $3 \lambda_N$  trasversalmente
- Risoluzione energetica: **RO digitale** (a singola soglia) e **semi-digitale** (soglie multiple) per celle di  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  e  $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 
  - RO SDHCal raggiunge **risoluzioni migliori** rispetto al DHCal
  - RO SDHCal  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  e  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  **confrontabili** -> possibilità di ridurre # di canali di lettura
    - **Piani futuri**: **ottimizzazione delle soglie** ( $t_1, t_2, t_3$ ) del RO SDHCal per tecnologia MPGD

## Simulazione MPGD-HCal nel Muon Collider framework – studi di ricostruzione dei jet

- Confronto di prestazioni (efficienza di ricostruzione, risoluzione in  $p_T$ ) tra baseline e MPGD-HCal **promettente**
  - **Piani futuri**: studi di **ottimizzazione della geometria** MPGD-HCal, con RO DHCal e SDHCal

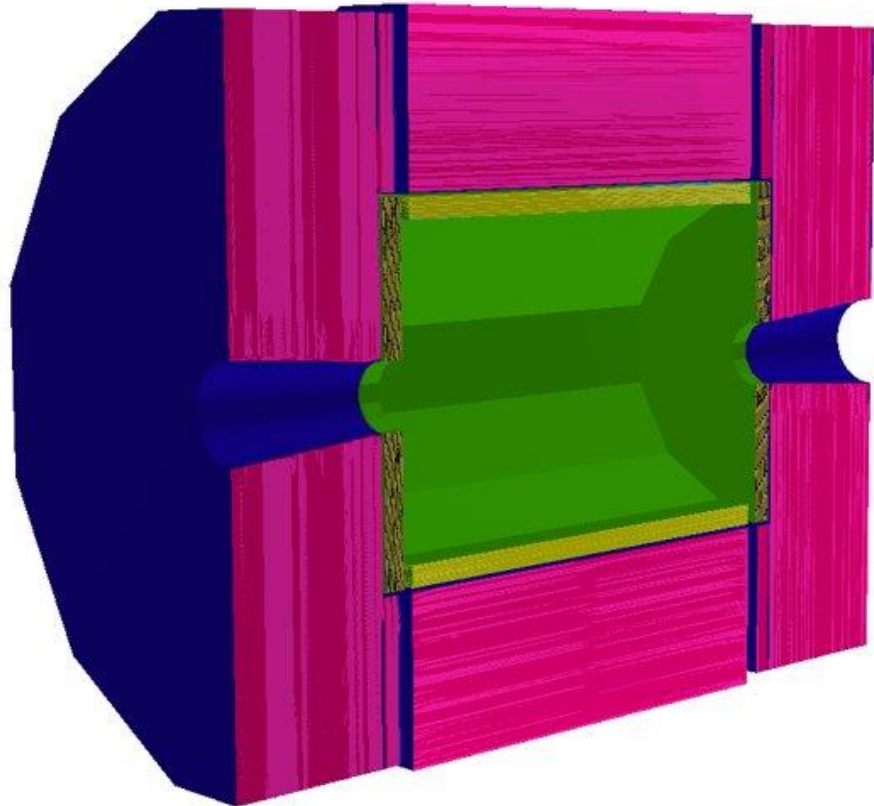
## Test sperimentali su prototipo con MPGD: $20 \times 20 \text{ cm}^2$ – 6 layer ( $\sim 1 \lambda_N$ )

- < 50% di contenimento fino a 10 GeV
  - **Piani futuri**: ottimizzare la selezione degli eventi sulla base del contenimento
- **In corso**: test su singole camere ( $\mu$ Megas,  $\mu$ RWELL) per misurare le prestazioni (**guadagno, uniformità**)
  - **Piani futuri**: test beam **con MIP** su telescopio di sole camere + test beam **con  $\pi$  da 1 a 10 GeV** su calorimetro

# Backup



# Geometria del calorimetro adronico nel software Muon Collider



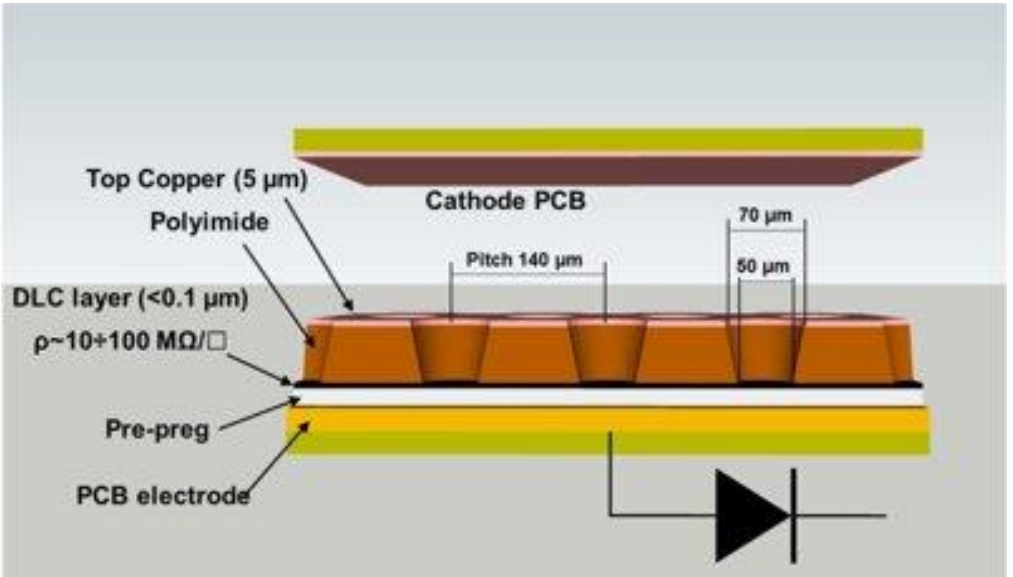
Barrel			
$R_{\min}$ [m]	$R_{\max}$ [m]	$Z_{\max}$ [m]	#layers
1.74	3.33	2.21	60

Endcap				
$R_{\min}$ [m]	$R_{\max}$ [m]	$Z_{\min}$ [m]	$Z_{\max}$ [m]	#layers
0.31	3.25	2.54	4.13	60

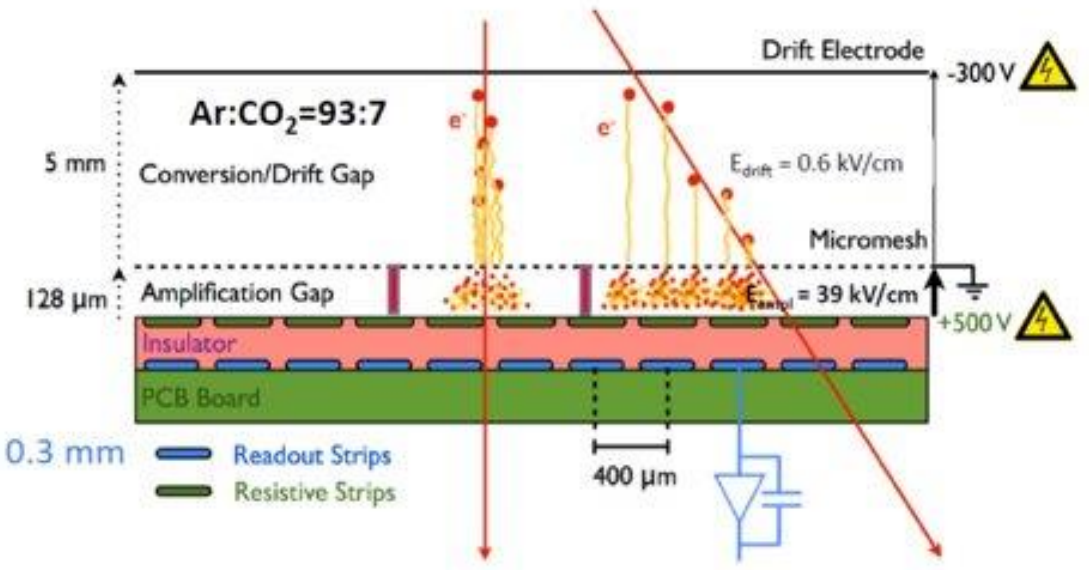
Ring				
$R_{\min}$ [m]	$R_{\max}$ [m]	$Z_{\min}$ [m]	$Z_{\max}$ [m]	#layers
0.31	3.25	2.54	4.13	60

# Rivelatori MPGDs

## μ-RWELL



## μmegas resistiva



- Alta risoluzione spaziale ( $< 60 \mu\text{m}$ ) e temporale (7 - 10 ns)
- Alta *rate capability*
  - Stabilità di guadagno testata fino a  $10 \text{ MHz/cm}^2$

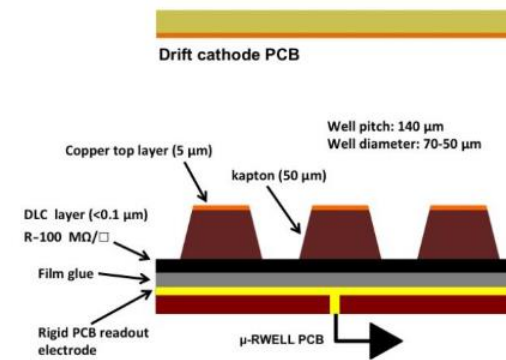


# Rivelatori per prototipo di calorimetro

	$\mu$ egas resistiva	$\mu$ RWELL
Deriva	6 mm	6 mm
Amplificazione	100 $\mu$ m	50 $\mu$ m
DLC	2 strati	1 strato
RO pads	384 x 1 cm <sup>2</sup>	384 x 1 cm <sup>2</sup>

## Struttura WELL

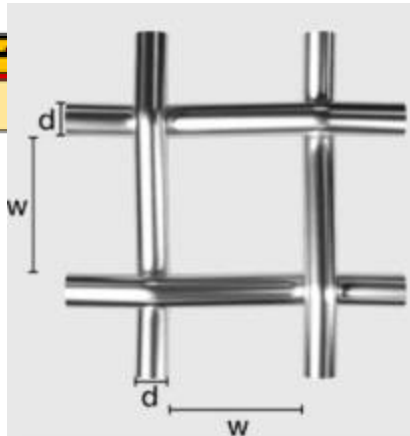
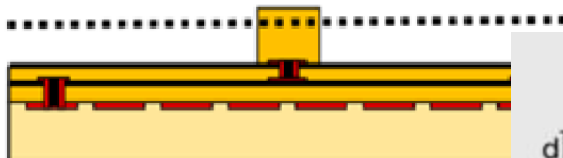
- Diametro: 50 -70  $\mu$ m
- Passo: 140  $\mu$ m
- Spessore: 50  $\mu$ m



$\mu$ RWELL al microscopio



## $\mu$ egas resistiva



## Struttura MESH

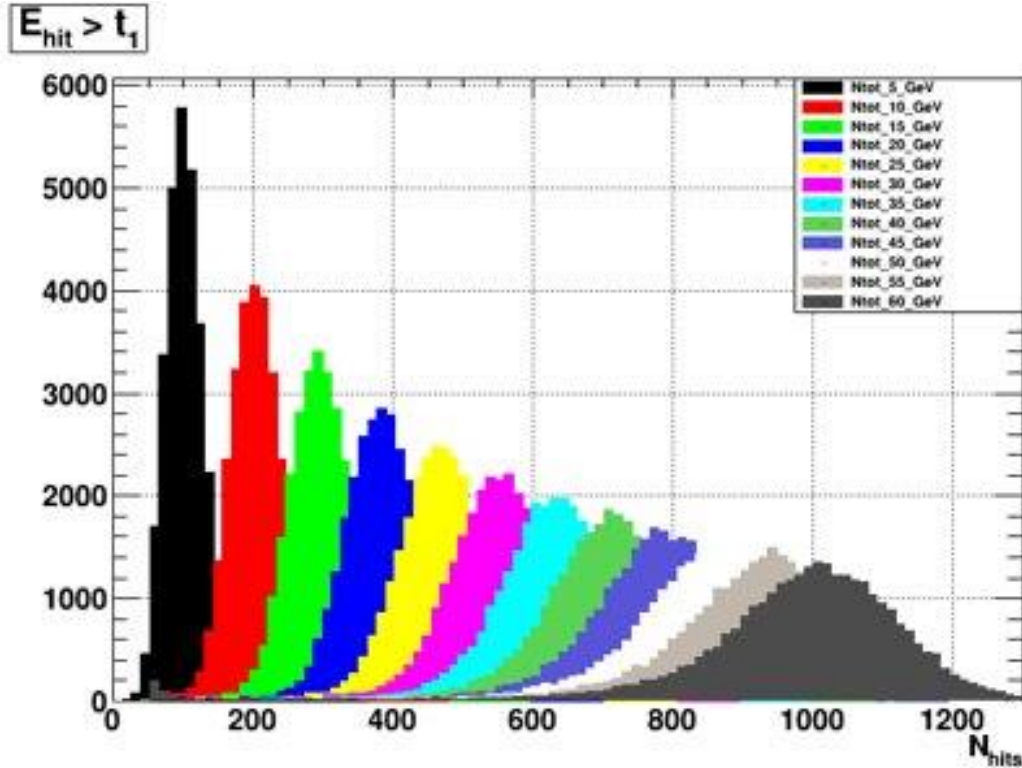
- d: 18  $\mu$ m
- w: 45  $\mu$ m
- calenderato: 30  $\mu$ m

$\mu$ egas al microscopio

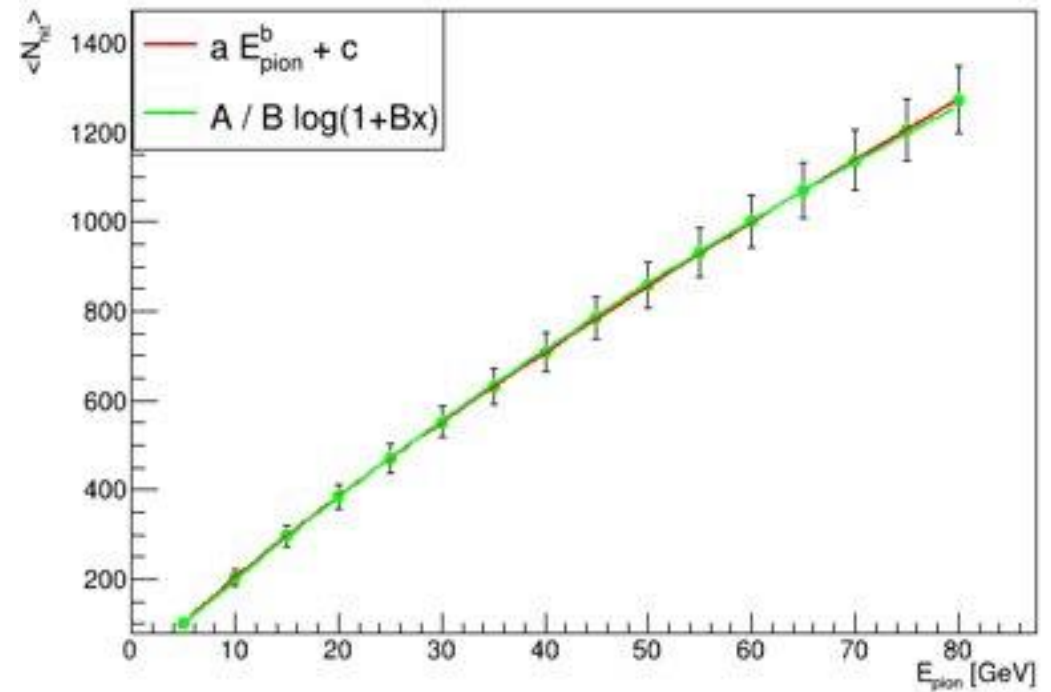


# Ricostruzione con DHCAL

Distribuzione di  $N_{hit}$  con energia superiore alla soglia ( $t_1$ ) al variare di  $E_\pi$



Funzione di risposta del calorimetro:  
 $\langle N_{hit} \rangle$  in funzione di  $E_{pion}$



# SDHCAL – confronto tra celle di 1x1 cm<sup>2</sup> e 3x3 cm<sup>2</sup>

1 MIP = 1.662 keV  
 energia rilasciata da  
 una MIP in 5 mm di  
 Ar

